

ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS NA SUINOCULTURA

FRANCO M. MARTINS¹, PAULO A. V. DE OLIVEIRA²

RESUMO: A demanda por fontes alternativas de energia tem crescido nos últimos anos em função das variações do preço do petróleo aliadas à recente crise energética. Por meio da digestão anaeróbia é possível transformar os dejetos de suínos em biogás. No presente trabalho, estudou-se a viabilidade econômica do uso do biogás como fonte alternativa para a geração de energia elétrica para diferentes períodos de geração. O método utilizado para a avaliação econômica foi o Valor Presente Líquido. O tempo de retorno do capital investido também foi calculado levando em consideração o desconto da taxa de juros nos fluxos de caixa. O estudo demonstrou ser economicamente viável a utilização do biogás da suinocultura, como fonte para geração de energia elétrica. O aumento da demanda de energia elétrica na propriedade aumenta o Valor Presente Líquido e diminui o tempo de retorno do investimento.

PALAVRAS-CHAVE: biogás, suínos, energia elétrica, análise econômica.

ECONOMIC ANALYSIS OF THE GENERATION OF ELECTRIC ENERGY FROM BIOGAS IN PIG PRODUCTION

ABSTRACT: The demand for alternative sources of energy has grown in recent years in line with the variation of petroleum prices coupled with the recent energy crisis. Through anaerobic digestion swine manure can be converted into biogas. In the present study it was evaluated the economic viability of using biogas as an alternative source for the production of electricity, for different periods of generation. The method used for the economic evaluation was the Net Present Value (NPV). The time of return on invested capital was also calculated taking into account the discount interest rate on cash flows. The study proved to be economically viable use of biogas from swine manure as a source for generating electricity. The increased demand for electricity in the property increases the Net Present Value and decreases the time required for return of the investment.

KEYWORDS: biogas, swine, electricity, economical analysis.

INTRODUÇÃO

A produção de suínos em Santa Catarina é desenvolvida em pequenas e médias propriedades, com topografia acidentada e apresenta elevado grau de concentração de suínos por unidade de área. Esses fatores limitam o uso de dejetos como fertilizante orgânico (OLIVEIRA et al., 2006). A biodigestão anaeróbia é um processo que transforma os dejetos gerados na suinocultura em biogás (LA FARGE, 1995). O biogás é uma fonte renovável de energia formada por uma mistura de metano (CH₄) e de gás carbônico (CO₂), com concentrações de 65% e 35%, respectivamente, e pode substituir as fontes convencionais na produção de suínos (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006; GUSMÃO, 2008). Estudos sobre a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por dejetos de suínos são recentes (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006; ZAGO, 2003), e a inclusão da análise econômica é ainda pouco explorada. Com a perspectiva de comercialização de créditos de carbono, houve, a partir de 2005, um crescente interesse e aumento na adoção de biodigestores pelos produtores de suínos (MCT, 2009). Isso levou a um considerável incremento na disponibilidade de

¹ Eng^o Agrícola, M.Sc. em Engenharia de Produção, Pesquisador, Embrapa Suínos e Aves, Concórdia - SC, franco@cnpa.embrapa.br.

² Eng^o Agrícola, PhD em Ciências do Meio Ambiente, Pesquisador, Embrapa Suínos e Aves, Concórdia - SC, paolive@cnpa.embrapa.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 5-11-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 12-4-2011

biogás e ao surgimento da alternativa da geração de energia elétrica que pode ser aproveitada no sistema de produção ou ser vendida para as concessionárias.

COSTA (2006) avaliou o potencial de geração de energia elétrica de sistema de tratamento de esgoto, comparando uma microturbina e um conjunto motor-gerador para fornecer 30 kW. Para o gerador, o investimento inicial foi de R\$ 822,67 por kW instalado, e o custo da geração foi de R\$ 0,034 kWh⁻¹. Este projeto foi viável, ao contrário da turbina. SOUZA et al. (2006) analisaram economicamente o uso do biogás da bovinocultura e o aproveitamento da energia na irrigação. Para uma tarifa de R\$ 190,00 MWh⁻¹, os tempos de retorno do capital, considerando o desconto da taxa de juros, foram de 8,6 e 4 anos para períodos de geração diária de 4 e 10 horas, respectivamente.

KEYMER & REINHOLD (2006) analisaram economicamente a produção de energia elétrica e calor em dois projetos instalados na Alemanha. No primeiro projeto, foi avaliada a geração de 55 kWh a partir do biogás produzido por dejetos de bovinos. No segundo, utilizaram-se dejetos de suínos e bovinos para gerar 330 kWh. Os investimentos foram, respectivamente, de R\$ 9.805,00 kW⁻¹ (€ 4.456,00)¹ e R\$ 5.104,00 kW⁻¹ (€ 2.320,00). A energia elétrica e o calor gerado foram utilizados na produção agropecuária. O excedente foi comercializado. A viabilidade ocorreu pelo aporte de subvenções do governo a projetos de geração de energias renováveis. STOKES et al., (2008) avaliaram a geração a partir da biodigestão de dejetos de bovinos no Estado da Pennsylvania, nos Estados Unidos. Diferentes cenários de uso e comercialização da energia e utilização do biofertilizante gerado foram analisados. O investimento foi de R\$ 593.015,00² (US\$ 311.000,00) para geração de 665.000 kWh ano⁻¹. Os autores também concluíram que a viabilidade depende de subsídios.

ESPERANCINI et al. (2007) avaliaram o uso do biogás gerado pelos dejetos de suínos na substituição de fontes de energia num assentamento rural. No uso domiciliar, o biogás foi aproveitado na cocção, aquecimento de água e iluminação. A economia anual foi de R\$ 3.698,00, e a recuperação do investimento ocorreu em 2,5 anos. Na produção, a energia foi utilizada em diversos equipamentos. A economia anual foi de R\$ 9.080,57, e o investimento foi recuperado em 11 meses. LA FARGE (1995) apontou viabilidade econômica de geração de eletricidade em oito biodigestores de dejetos de suínos. A recuperação do capital ocorreu em períodos entre 5 e 6 anos.

O custo para gerar 39 kWh, com biogás da suinocultura, foi estudado por SOUZA et al., (2004) que concluíram que a viabilidade do sistema depende da tarifa e da demanda. Com a tarifa de R\$ 190,00 MWh⁻¹, o tempo de recuperação do investimento, considerando o desconto da taxa de juros, foi de 5 anos. OLIVEIRA & MARTINS (2007) estudaram a viabilidade econômica do uso de um gerador disponibilizando 40 kWh, utilizando biogás da suinocultura, e concluíram que esta alternativa é viável à medida que aumentam a demanda e o preço da energia. Com uma tarifa de R\$ 200,00 MWh⁻¹, o tempo retorno do investimento, considerando desconto da taxa de juros, foi de 39; 26 e 19 meses para tempos de geração diária de 10; 14 e 18 horas, respectivamente.

O objetivo deste trabalho foi analisar economicamente a utilização do biogás, como fonte de energia, para acionar um gerador de energia elétrica, para diferentes níveis de demanda e suas implicações, não apenas nas alterações no investimento inicial, mas também no tamanho do lote de suínos necessário para atender à demanda de biogás pelo sistema motor-gerador.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados observados em levantamento realizado em granjas de produção de suínos localizadas no Estado de Santa Catarina (OLIVEIRA et al., 2006). O estudo foi baseado no aproveitamento do biogás gerado pelos resíduos produzidos no sistema de produção de suínos, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1.

¹ Cotação do EURO: R\$2,2039. Fonte: Banco Central do Brasil. Disponível em: www.bcb.gov.br. Consulta em 25 de junho de 2010.

² Cotação do Dólar: R\$1,8068. Fonte: idem 1.

O sistema de produção gera resíduos (biomassa) que o biodigestor transforma em metano que, por sua vez, é utilizado como combustível substituto da gasolina no motor que aciona o gerador.

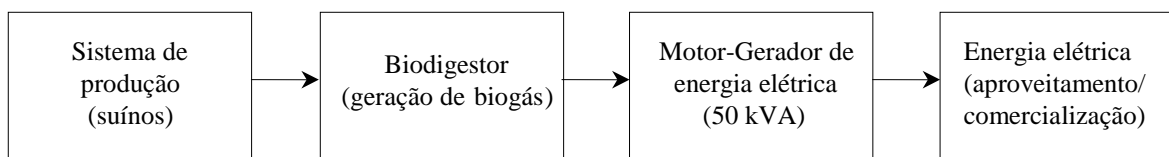


FIGURA 1. Fluxograma de produção de biogás para geração de energia elétrica. **Flowchart of biogas production for electricity generation.**

Os dejetos são conduzidos para o biodigestor, que é revestido com vinimanta de PVC. O biogás é transportado do biodigestor até o conjunto motor-gerador por tubulação que contém pontos de purga d'água, para remoção de umidade que se desenvolve na digestão anaeróbia. Com o objetivo de evitar o efeito corrosivo do H_2S , são utilizados filtros de limalha de ferro. O manejo dos dejetos adotado nas granjas observadas consistia em raspagem diária, sendo observada a concentração de Matéria Seca entre 4 a 6% (40 a 60 kg m^{-3}). O gerador de eletricidade utilizado na análise é trifásico (220/380 VAC), 3.600 rpm, 60 Hz, capacidade de 50 kVA (40 kW de carga efetiva), com controle eletrônico de rotação, sendo acoplado a Motor VOLKSWAGEN, AP2000-4 cilindros, adaptado para uso com biogás e refrigerado por trocador de calor com aproveitamento da água de refrigeração do motor para geração de água quente.

No desenvolvimento da análise econômica, foi necessário estimar a demanda de biogás em função do período de geração de energia e o número de suínos necessário para fornecer o volume de dejetos requerido na alimentação do biodigestor.

A demanda de biogás, o volume do biodigestor e o número de suínos necessário no plantel foram estimados, respectivamente, através das seguintes equações:

$$D_{bio} = C_m t_g \quad (1)$$

em que,

D_{bio} - quantidade de biogás a ser produzida pelo biodigestor, $m^3 \text{ dia}^{-1}$;

C_m - consumo médio de biogás do motor-gerador, $m^3 \text{ hora}^{-1}$, e

t_g - período de geração, horas dia^{-1} .

$$V_{bio} = \frac{1}{k} D_{bio} \quad (2)$$

em que,

V_{bio} - volume de biomassa no biodigestor, m^3 , e

k - índice de eficiência de produção de biogás no biodigestor, $m^3 \text{ biogás } m^3 \text{ biomassa}^{-1}$.

$$N_{sui} = \left(\frac{V_{bio}}{TRH} \right) / V_{dej} \quad (3)$$

em que,

N_{sui} - número de suínos necessário para a produção de dejetos;

TRH - tempo de retenção hidráulica, dias, e

V_{dej} - volume médio de dejetos produzido por suíno, $m^3 \text{ dia}^{-1}$.

A quantidade de biogás a ser produzida no biodigestor (D_{bio}) é determinada pela demanda do conjunto motor-gerador. Segundo observações de campo (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006), o consumo do gerador (C_g) pode variar entre 20 a 25 $m^3 \text{ hora}^{-1}$. No entanto, adotou-se o valor de 25 $m^3 \text{ hora}^{-1}$, para garantir uma margem de segurança na operação do biodigestor. O índice de eficiência de produção de biogás (k) pode variar de 0,35 a 0,60 $m^3 \text{ biogás } m^3 \text{ biomassa}^{-1}$ de acordo

com OLIVEIRA & HIGARASHI (2006) e KUNZ & OLIVEIRA (2006). No presente estudo, adotou-se o índice de $0,40 \text{ m}^3 \text{ biogás m}^3 \text{ biomassa}^{-1}$ para um Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) de 30 dias. O volume diário de dejetos produzido por suínos depende da massa metabólica do animal, da qualidade da alimentação e do manejo dos dejetos. O volume de dejetos adotado (V_{dej}) foi o gerado por suínos nas fases de crescimento e terminação (com massa entre 22 kg e 110 kg), que é de $0,005 \text{ m}^3 \text{ animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, de acordo com OLIVEIRA & SILVA (2006). Após a determinação destes parâmetros, é possível calcular o volume do biodigestor e o número de suínos necessário para gerar a quantidade de biomassa requerida para produzir o volume de biogás demandado pelo sistema. Para isso, é necessário determinar o período diário (t_g) em que o conjunto motor-gerador deve gerar energia. Esse período depende das necessidades de energia dimensionadas para atender, por exemplo, ao conjunto de atividades produtivas, ao consumo residencial ou à comercialização. A Tabela 1 apresenta os volumes de biogás e biomassa, o volume dos biodigestores e o número de suínos para atender às necessidades de consumo de biogás nos diferentes períodos de geração de energia.

TABELA 1. Parâmetros técnicos utilizados na análise. **Technical parameters used in the analysis.**

Período de Geração (t_g) horas dia ⁻¹	Demanda de biogás (D_{bio}) ($\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$)	Volume de Biomassa (V_{bio}) (m^3)	Número de Suínos (N_{sui})
10	250	625	4.167
14	350	875	5.833
18	450	1.125	7.500
22	550	1.375	9.167

O método adotado na análise econômica foi o Valor Presente Líquido (VPL) e, a partir da aplicação do mesmo, também foi obtido o Tempo de Retorno de Capital Descontado (TR_d) (CASAROTTO FILHO & KOPITTKKE, 2008). O VPL é calculado por:

$$VPL = -C_0 + \frac{R_1 - C_1}{1+r} + \frac{R_2 - C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{R_T - C_T}{(1+r)^T} \quad (4)$$

em que,

VPL - soma atualizada dos lucros que o decisor auferire ao longo do período de planejamento do projeto, R\$;

C_0 - capital necessário para o investimento inicial, R\$;

R_t - receita anual, R\$;

C_t - desembolso anual, R\$;

r - taxa de juros anual, %, e

T - horizonte de planejamento do projeto, anos.

O Tempo de Retorno Descontado (TR_d) é determinado pelo período em que o VPL do projeto se torna positivo, levando-se em conta o desconto dos juros nos fluxos nominais previstos. Assim, obtêm-se uma estimativa mais precisa para os períodos de retorno do que aquelas estimadas simplesmente pelo tempo em que a soma das receitas líquidas anuais leva para se igualar ao capital investido (C_0). A receita (R_t) corresponde ao valor da energia que o produtor deixa de pagar ao aproveitar a geração com o biogás ou o valor obtido com a comercialização, considerando-se o limite de 40 kWh, multiplicada pelo valor da tarifa. O desembolso (C_t) foi definido pela soma dos custos de manutenção do motor-gerador e do biodigestor. A receita líquida anual é a diferença entre a receita (R_t) e o desembolso (C_t). A taxa de juros (r) foi definida em 6,46% ao ano, correspondente à taxa real de juros da economia brasileira em março de 2009. Os preços e parâmetros utilizados na definição dos custos de manutenção foram informados pelos fabricantes. Foi considerado que o manejo do biodigestor e do gerador faz parte das atividades rotineiras do sistema de produção. Por

outro lado, o gerador possui nível de automação que não implica incremento significativo de mão de obra. Portanto, este custo não foi incluído na análise.

Para avaliar a economia na utilização de energia elétrica, na primeira simulação, foi adotada a tarifa de R\$ 0,20 kWh⁻¹, praticada pela empresa Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC, 2009), em março de 2009, definida como “B2/Convencional Rural”. A alternativa de comercialização foi analisada com os preços praticados no Paraná, pois este Estado, em 2009, era o único onde a compra de energia gerada por biogás, oriundo de biodigestores alimentados com dejetos e fornecida com pequenos geradores, já estava regulamentada. A tarifa adotada para a análise da compra de energia foi de R\$ 0,128 kWh⁻¹, de acordo com chamada pública da Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2009).

No Paraná, o valor da tarifa de utilização da energia foi de R\$ 0,23 kWh⁻¹, também correspondente à categoria “B2/Convencional Rural”. A demanda de energia elétrica pode variar em função da carga necessária nos sistemas produtivos e nas demais instalações existentes. Assim, o modelo foi aplicado com as horas diárias de geração, variando de 10 a 22 horas. O horizonte de planejamento (T) foi de oito anos. Primeiramente, foi analisada a viabilidade do investimento no conjunto motor-gerador e biodigestor. A outra análise considerou biodigestor já instalado, e o investimento ficou restrito ao gerador.

Outras análises desenvolvidas foram: cálculo de tarifas que asseguram períodos de retorno (TR_d) predefinidos, efeito da variação da tarifa no resultado econômico, cálculo do período mínimo de geração, do mesmo gerador, para diferentes tamanhos de biodigestor, para que o sistema seja viável economicamente e o equivalente em necessidade de energia (kWh) para diferentes tamanhos de biodigestor e tarifas de energia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, apresenta-se o orçamento para instalação de materiais dos diferentes volumes de biodigestor. As informações sobre os orçamentos e custos de manutenção foram obtidas junto ao fabricante.

TABELA 2. Orçamento dos biodigestores. **Budget of the digesters.**

Descrição	Volume do Biodigestor (m ³)			
	625	875	1.125	1.375
Terraplenagem e escavação	5.181,00	5.619,00	7.059,00	8.686,00
Parte civil e bomba hidráulica	11.398,00	11.665,00	13.778,00	15.865,00
Tubos e conexões	1.428,00	1.327,00	1.753,00	1.783,00
Manta superior e inferior - PVC	24.956,00	28.425,00	35.556,00	42.327,00
Acessórios - fixação	5.008,00	5.319,00	6.206,00	7.527,00
Mão de obra	4.030,00	4.645,00	5.648,00	6.312,00
Total	52.000,00	57.000,00	70.000,00	82.500,00

O custo anual de manutenção dos biodigestores foi estimado em 2,5% do valor inicial. O valor de aquisição do conjunto motor-gerador foi de R\$ 45.000,00, e os custos de manutenção foram calculados de acordo com as recomendações do fabricante. O programa prevê troca de velas, óleo lubrificante e retífica do motor a cada 180; 400 e 10.000 horas, respectivamente. Os respectivos preços destas intervenções são R\$ 72,00, R\$ 28,00 e R\$ 2.500,00, respectivamente. A quantidade de intervenções anuais, em cada componente, foi definida através da divisão do tempo anual de geração pelo intervalo de tempo entre as mesmas. Na Tabela 3, apresentam-se as intervenções necessárias e o custo anual de manutenção, de acordo com o período de geração.

TABELA 3. Custo anual de manutenção do conjunto motor-gerador. **Annual maintenance cost of the engine-generator.**

Período de Geração		Intervenções por Ano				Custos Anuais: R\$ ano ⁻¹		
h dia ⁻¹	h dia ⁻¹	Troca de velas	Troca de óleo	Retífica	Velas	Óleo Lubrif.	Retífica	Total
10	3.600	20	9	0,36	1.440,00	252,00	900,00	2.592,00
14	5.040	28	12,6	0,50	2.016,00	352,80	1.260,00	3.628,80
18	6.480	36	16,2	0,65	2.592,00	453,60	1.620,00	4.665,60
22	7.920	44	19,8	0,79	3.168,00	554,40	1.980,00	5.702,40

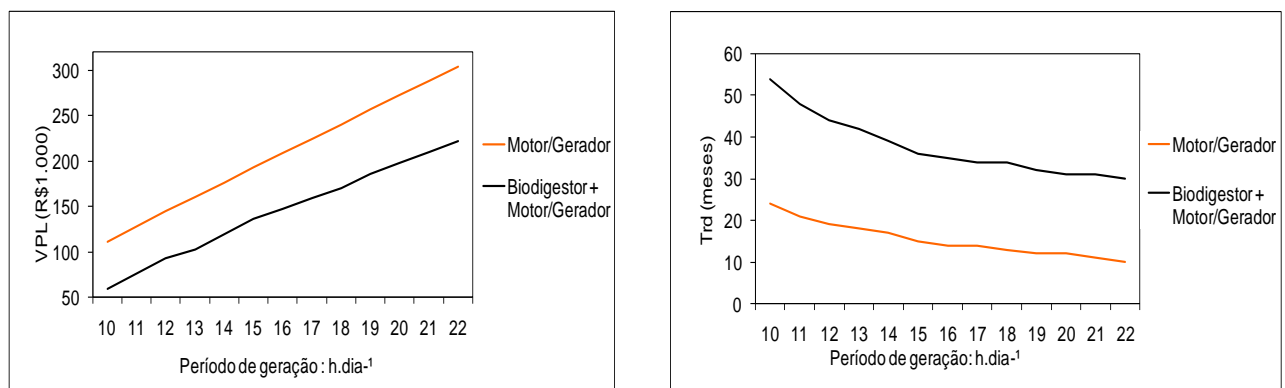
Na Tabela 4, apresentam-se o número de suínos, o custo anual, o investimento inicial e a receita líquida anual para as duas situações analisadas.

TABELA 4. Número de suínos, custo, receita e investimento para diferentes períodos de geração. **Number of pigs, cost, revenue and investment for different periods of generation.**

Período de geração (t_g) (h dia ⁻¹)	Número de Suínos (N_{sui})	Custo Anual (C_t) (R\$)	Receita Líquida Anual (R_t) (R\$)	Investimento Inicial (Biodigestor e Gerador) (C_0) (R\$)	Investimento Inicial (Gerador) (C_0) (R\$)
10	4.167	3.892	24.908	97.000	45.000
14	5.833	5.054	35.266	102.000	45.000
18	7.500	6.416	45.424	115.000	45.000
22	9.167	7.765	55.595	127.500	45.000

Como os volumes dos biodigestores são os mesmos, em ambos os projetos, os respectivos lotes de suínos, custos e receitas associados a cada período de geração são iguais. Assim, para a análise econômica, a diferença restringe-se ao investimento inicial.

Na Figura 2, apresenta-se a evolução do VPL e do TR_d para os dois casos analisados, de acordo com o período de geração.

FIGURA 2. Variação do VPL e do $Tr_{(d)}$ em função do período de geração de energia elétrica. **Variation in VPL and $Tr_{(d)}$ according to the period of power generation.**

Para o projeto onde é necessário investir no biodigestor e no conjunto motor-gerador, os resultados indicam que é viável economicamente gerar energia num período de 10 h dia⁻¹. Neste caso, são necessários 4.167 suínos para atender à demanda de biogás. Para este nível de geração, o custo anual (C_t) foi de R\$ 24.908,00, o VPL foi de R\$ 53.398,00 e o TR_d foi de 54 meses. Estes resultados mostram relativa proximidade com o obtido em SOUZA et al. (2004), onde foi avaliado

um gerador com potência de 40 kW, gerando 200 m³ dia⁻¹ de biogás, durante 10 horas dia⁻¹, para uma tarifa de R\$ 0,19 kWh⁻¹. Simulando o impacto desta tarifa no presente estudo, para um período de geração de 10 h dia⁻¹, obteve-se um VPL de R\$ 50.356,00, receita líquida anual de R\$ 23.648,00 e Tr_(d) de 58 meses. Na simulação para 22 horas dia⁻¹ de geração e tarifa de R\$ 0,20 kWh⁻¹, o VPL foi de R\$ 221.582,00 e o TR_d foi de 30 meses, ou seja, houve uma redução de 24 meses em relação ao TR_d de 54 horas.

Na análise do projeto com biodigestor já instalado, a diferença no resultado econômico foi devida à redução do montante de capital investido. Neste caso, para cada período diário de geração de energia elétrica, VPL e TR_d tiveram, respectivamente, aumento e redução significativos em relação ao primeiro. Considerando os períodos de geração de 10 e 22 h dia⁻¹, o VPL variou entre R\$ 111.397,00 e R\$ 304.082, respectivamente. Para os mesmos períodos, o TR_d foi reduzido de 24 para 10 meses. Os custos anuais aumentam com o aumento do período de geração devido ao aumento da frequência de intervenções necessárias, de acordo com a Tabela 4. No entanto, o aumento de custo é compensado pela economia gerada. Os cálculos revelaram também que, para cada hora adicional de geração de energia elétrica, exige-se um aumento de 417 animais no plantel. Este parâmetro é importante para verificar a adequação do sistema de produção às necessidades de energia elétrica nos projetos de geração a partir do biogás.

No trabalho de STOKES et al. (2008) que se percebe que o nível de investimento necessário é significativamente maior em função do nível tecnológico dos biodigestores. Outro aspecto observado é que o preço da energia elétrica também é menor. Os preços apontados pelos autores foram de aproximadamente R\$ 0,18/kWh para energia fornecida pela concessionária. Este valor é 10% inferior à tarifa da CELESC (R\$ 0,20 kWh⁻¹) e 21,7% inferior à praticada pela COPEL (R\$ 0,23 kWh⁻¹). No entanto, o preço máximo de comercialização da energia (R\$ 0,054 kWh⁻¹) apontado pelos autores nos diferentes cenários de análise é significativamente inferior ao praticado pela COPEL, que foi de R\$ 0,128 kWh⁻¹.

No estudo KEYMER & REINHOLD (2006), mesmo com tempo de geração de 22 h dia⁻¹, a geração (55 kWh) somente com dejetos de bovinos mostrou-se inviável economicamente. Neste caso, o nível de investimento também foi superior ao determinado no presente trabalho onde, para o mesmo período de geração, porém com geração de 40 kWh, o investimento no biodigestor/motor-gerador foi de R\$ 3.187,00 kWh⁻¹. Ou seja, este nível de investimento foi cerca de três vezes inferior ao apontado pelos autores. No sistema que utiliza dejetos de bovinos e suínos com gerador de potência de 330 kW, também para um período de geração de eletricidade de 22 h dia⁻¹, KEYMER & REINHOLD (2006) verificaram ganhos de escala que viabilizaram o projeto. Neste caso, o investimento inicial foi de R\$ 5.104,00 kWh⁻¹.

Como a suinocultura é uma atividade sujeita à volatilidade do mercado, considera-se importante analisar condições que levam a períodos de retorno menores. Assim, foram calculados os preços mínimos de kWh, considerando a utilização da energia elétrica na propriedade, que garantiriam o retorno do investimento em períodos prefixados (Tr_d em meses). Na Figura 3, apresentam-se as curvas de tarifas mínimas para as duas situações analisadas.

Para o investimento no biodigestor e no conjunto motor-geração, os resultados indicam que, gerando energia elétrica durante 10 horas dia⁻¹, o produtor tem o retorno (Tr_d) em 60 meses (5 anos) se a tarifa de energia for em torno de R\$ 0,19. A simulação para Tr_d de 60 meses, com tempo de geração de 18 horas dia⁻¹, resulta numa tarifa de R\$ 0,13 kWh⁻¹, muito próximo, portanto, do preço de comercialização para a COPEL.

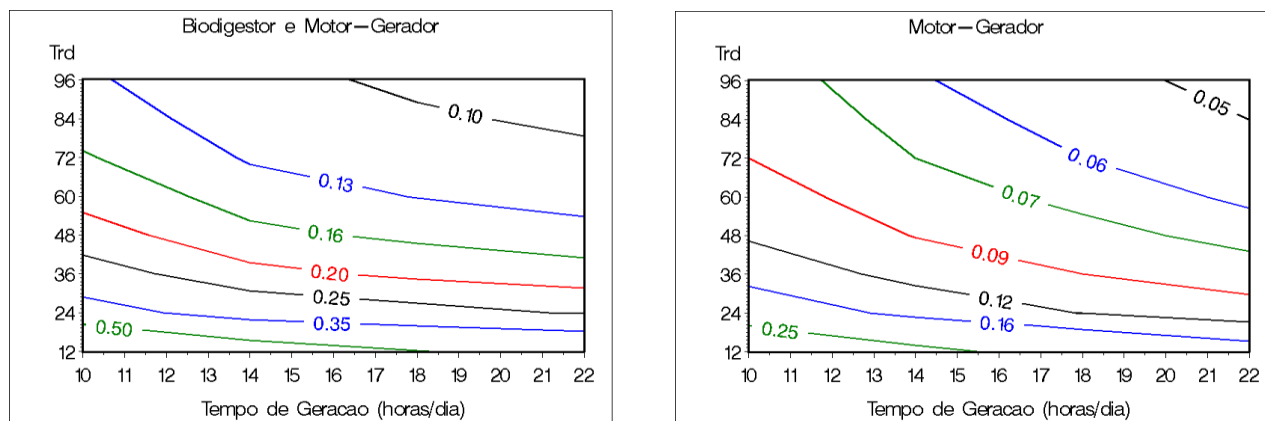


FIGURA 3. Tarifas mínimas para diferentes períodos de geração e tempos de retorno do capital. **Minimum rates for different periods of electricity generation and time of the capital return.**

Para o caso onde é necessário investir apenas no conjunto motor-gerador, as tarifas mínimas são menores. Para o período de geração de energia de 10 e 18 horas dia⁻¹, as tarifas encontradas foram próximas de R\$ 0,10 e R\$ 0,07, respectivamente, considerando Tr_d de 60 meses. Os resultados mostram que os preços mínimos observados são inferiores aos praticados no mercado, o que também mostra a atratividade para o uso da energia na propriedade.

Na Tabela 5, apresenta-se o efeito da variação da tarifa, para o projeto onde é necessário investir no biodigestor e no conjunto motor-gerador, nos indicadores econômicos.

TABELA 5. Efeito da variação da tarifa de energia nos resultados econômicos. **Effect of variation in the rate of energy on economic outcomes.**

Geração h dia ⁻¹	Resultados Econômicos	Tarifa de Energia Elétrica (R\$ kWh ⁻¹)				
		0,128	0,200	0,210	0,220	0,230
10	Receita Líquida (R\$)	14.540	24.908	26.348	27.788	29.228
	VPL (R\$)	-5.703	59.397	68.439	77.481	86.522
	Trd (meses)	104	54	51	48	45
14	Receita Líquida (R\$)	20.751	35.266	37.282	39.298	41.314
	VPL (R\$)	28.2956	119.437	132.095	144.754	157.412
	Trd (meses)	71	39	37	35	33
18	Receita Líquida (R\$)	26.762	45.424	48.016	50.608	53.200
	VPL (R\$)	53.034	170.220	186.495	202.770	219.046
	Trd (meses)	61	34	32	30	28
22	Receita Líquida (R\$)	32.785	55.595	58.763	61.931	65.099
	VPL (R\$)	78.360	221.582	241.474	261.366	281.258
	Trd (meses)	54	30	29	27	26

Na primeira coluna, verificam-se os resultados obtidos com o preço de venda de energia elétrica. Se a geração for de 10 horas dia⁻¹, a comercialização possibilitaria o retorno do investimento em 104 meses (8,7 anos). Esta alternativa é menos atrativa, pois o preço de compra pela COPEL é de R\$ 0,128 kWh⁻¹, enquanto a da tarifa de venda é de R\$ 0,23 kWh⁻¹. A comercialização pode ser mais atrativa quando houver excedentes de energia. Nas demais colunas, verifica-se que o aumento da tarifa, associado ao aumento do período de geração, diminui o TR_d e aumenta a receita líquida e o VPL.

Na Tabela 6, apresenta-se o período mínimo de geração e o equivalente em necessidade de energia (kWh), considerando o investimento no biodigestor e no gerador para diferentes volumes de

biodigestor, para que o sistema seja viável economicamente. Para determinado volume de biodigestor, o aumento da tarifa reduz tanto o período mínimo de geração quanto a necessidade de energia, na propriedade, que viabilizariam o projeto. Para um volume de biodigestor de 625m³, se houver geração a partir de 10,5 h.dia⁻¹, ou o equivalente a 420 kWh de necessidade diária, o projeto é viável para uma tarifa mínima de R\$ 0,128/kWh. Para os biodigestores de maior volume, o período mínimo de geração é maior. Para o biodigestor de 1.375 m³, por exemplo, o período mínimo seria de 15,2 h.dia⁻¹ ou 609 kWh de necessidade diária de energia, considerando a mesma tarifa.

TABELA 6. Tempo mínimo de geração e necessidade de energia para diferentes volumes de biodigestor e tarifas de energia. **Minimum generation time and energy requirements for different volumes of digester and energy prices.**

Volume do Biodigestor (m ³)	Período de geração (h dia ⁻¹) e necessidade de energia (kWh).	Tarifa (R\$ kWh ⁻¹)				
		0,128	0,200	0,210	0,220	0,230
625	h dia ⁻¹	10,5	6,7	6,4	6,1	5,84
	kWh	420	269	256	244	234
875	h dia ⁻¹	11,6	7,4	7,0	6,7	6,43
	kWh	462	296	282	269	257
1.125	h dia ⁻¹	13,4	8,6	8,2	7,8	7,47
	kWh	537	344	327	312	299
1.375	h dia ⁻¹	15,2	9,8	9,3	8,9	8,48
	kWh	609	390	371	354	339

Se for considerada a tarifa de R\$ 0,20 kWh⁻¹, o período mínimo de geração, economicamente viável, seria de 6,7 h dia⁻¹ (269 kWh), utilizando-se de um biodigestor de 625 m³ e 9,8 horas dia⁻¹ (390 kWh) para um biodigestor de 1.375 m³. As tarifas que proporcionaram menor período mínimo e necessidade energética são aquelas situadas na faixa das tarifas de consumo. Isso reforça a tese de que será sempre mais vantajoso se a energia puder ser utilizada no sistema de produção ou outras atividades desenvolvidas na propriedade.

CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a viabilidade econômica da geração de energia elétrica com o uso do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia de dejetos de suínos. Embora seja possível a comercialização, os resultados demonstram que é mais vantajoso economicamente o uso desta energia na propriedade rural, substituindo ou reduzindo a aquisição da energia elétrica distribuída pela concessionária. No entanto, é necessário que a propriedade tenha equipamentos, instalações que necessitem de uma quantidade de energia que justifique os investimentos na geração com o uso do biogás. Um fator limitante na viabilidade técnica do sistema de geração de eletricidade é o número de animais necessário para produzir os resíduos que são transformados em biogás.

Os aumentos da escala de produção e do consumo de energia na propriedade, além de eventuais adequações para a comercialização da energia elétrica, podem implicar a necessidade específica de mão de obra e investimentos adicionais. O impacto destas alterações pode ser avaliado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- CASAROTO FILHO, N.; KOPITKE, B. *Análise de investimentos*. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- CELESC. CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA. Disponível em: <<http://www.celesc.com.br>>. Acesso em: 15 out. 2009.

- COPEL. COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. *Chamada pública de compra de energia elétrica CP005/2008*. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/resultado_biogas/\\$FILE/VENCEDORES_biogas27_01_09.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/resultado_biogas/$FILE/VENCEDORES_biogas27_01_09.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2009.
- COSTA, D.F. *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*. 2006. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ESPERANCINI, M.S.T.; COLEN, F.; BUENO, O. de C.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMON, E.J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo. *Revista de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.1, p.110-118, 2007.
- GUSMÃO, M.M.F.C.C. *Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina*. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- KEYMER, U.; REINHOLD, G. Grundsätze bei der projekt planung. In: ROHSTOFFE, F.N. *Handreichchung biogasge winnung und-nutzung*. Gülzow: Institut Für Energetik Und Umwelt, 2006. p.182-209.
- KUNZ, A.; OLIVEIRA, P A V. Aproveitamento de dejetos animais para geração de biogás. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, v.15, n.3, p.28-35, 2006.
- LA FARGE, B. de. *Le biogaz: procédés de fermentation méthanique*. Paris: Masson, 1995. 237 p.
- MCT. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Status atual das atividades de projeto do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) no Brasil e no mundo*. Disponível em: <www.mct.gov.br/upd_blob/0206/206713.pdf>. Acesso em: 22 out. 2009.
- OLIVEIRA, P.A.V. de; ZANUZZI, C.M. da S.; de SOUZA, D.O. *Gestão ambiental de propriedades suínícolas: experiência do projeto suinocultura SC/PNMA II*. Florianópolis: FATMA/Embrapa Suínos e Aves, 2006. 104 p.
- OLIVEIRA, P.A.V. de; HIGARASHI, M.M. *Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos*. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. (Documentos, 115).
- OLIVEIRA, P.A.V. de; DA SILVA, A. P. *As edificações e os detalhes construtivos voltados para o manejo de dejetos na suinocultura*. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. (Documentos, 113).
- OLIVEIRA, P.A.V. de; MARTINS, F.M. Utilização do biogás na suinocultura para geração de energia elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. *Anais...* Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2007. 1 CD-ROM.
- SOUZA, S.N.M.; PEREIRA, W.C.; NOGUEIRA, C.E.C.; PAVAN, A.A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor-gerador utilizando biogás da suinocultura. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v.26, n.2, p.127-133, 2004.
- SOUZA, S.N.M.; COLDEBELLA, A.; SOUZA, J.; KOEHELER, A.C. Viabilidade econômica de uso de biogás da bovinocultura para geração de eletricidade e irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. *Anais...* Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. 1 CD-ROM.
- STOKES, J.R.; RAJAGOPALAN, R.M.; STEFANO, S.P. Investment in a methane digester: An application of capital budgeting and real options. *Review of agricultural economics*, Amsterdam, v.30, n.4, p.664-676, 2008.
- ZAGO, S. *Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do meio oeste catarinense*. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Blumenau, 2003.